

董晓全, 王雨滢, 何利梅, 等. 施用污泥对鹅掌藤根系生长和重金属吸收的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(4): 513-522.
DONG Xiaoquan, WANG Yuying, HE Limei, et al. Effects of sewage sludge application on root growth and heavy metal uptake of *Schefflera arboricola* [J].
Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(4): 513-522.

施用污泥对鹅掌藤根系生长和重金属吸收的影响

董晓全[✉], 王雨滢, 何利梅, 曾曙才, 吴道铭[✉]

(华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】分析表施和混施污泥对鹅掌藤 *Schefflera arboricola* 根系生长和重金属吸收的影响, 深入认识污泥施用对园林植物根系生长的影响, 为污泥在园林中安全利用提供借鉴。【方法】采用根箱试验, 观测不施、表施和混施 10%(w) 污泥对常见园林植物鹅掌藤的不同土层根系形态及土壤 pH 和电导率动态变化的影响, 分析根组织密度、根密度和重金属含量, 拟合土壤 pH、电导率、根系重金属含量与根长的关系。【结果】与不施污泥相比, 混施污泥明显抑制鹅掌藤根长、根表面积和根密度增长; 而表施污泥显著增加鹅掌藤 0~20 cm 土层的总根长、根体积和根密度。处理 240 d 后, 混施污泥处理的 0~20 与 20~40 cm 土层总根长分别为不施污泥的 66.37% 和 51.51%, 而表施污泥处理分别为不施污泥的 115.43% 和 98.66%。最大总根长、根体积和根密度均出现在表施污泥的 0~20 cm 土层, 最大根干质量和根组织密度出现在表施污泥的污泥层。混施污泥显著提高了土壤 pH 和电导率以及植株重金属含量, 不同土层根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量分别是不施污泥的 2.32~11.70 倍。线性回归拟合分析表明, 不施和表施污泥处理的 0~20 cm 土层鹅掌藤原位扫描总根长均与原位测定土壤 pH 呈极显著正相关 ($P<0.001$), 鹅掌藤总根长与根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量均呈极显著负相关 ($P<0.001$)。【结论】表施 10%(w) 污泥可以提高土壤 pH 并促进鹅掌藤根系生长。混施 10%(w) 污泥显著增加不同土层根系重金属含量, 进而抑制鹅掌藤根系生长。

关键词: 污泥; 园林利用; 园林植物; 根系形态; 重金属; pH; 鹅掌藤

中图分类号: S687; X703

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)04-0513-10

Effects of sewage sludge application on root growth and heavy metal uptake of *Schefflera arboricola*

DONG Xiaoquan[✉], WANG Yuying, HE Limei, ZENG Shuai, WU Daoming[✉]

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】This study aimed to analyze the effect of sewage sludge (SS) surface and mixed application on *Schefflera arboricola* root growth and heavy metals uptake, to deeply understand the effect of SS application on landscape plant root growth, and to provide a reference for the safe use of SS in the landscape. 【Method】We conducted a root box experiment without SS (no SS) and with the surface application (surface SS) or the mixed application (mixed SS) of 10% SS, to analyze the dynamic changes of *S. arboricola* root morphology, soil pH, and conductivity in different soil layers. Root tissue density, root density, and heavy metal contents of plant were also analyzed. The relationships between soil pH, soil conductivity, root heavy metal

收稿日期: 2022-06-13 网络首发时间: 2023-04-25 14:55:48

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230425.1124.002.html>

作者简介: 董晓全, 硕士研究生, 主要从事污泥资源化利用、植物根系生态研究, E-mail: 1365395634@qq.com; 通信作者: 吴道铭, 副教授, 博士, 主要从事林地和城市土壤质量提升、植物根系生理生态、园林凋落物资源利用以及土壤重金属污染防治研究, E-mail: dmwu@scau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (42177011, 41807112, 31971629); 广东省自然科学基金 (2021A1515011407, 2022A1515010909)

contents, and root length were further established by the linear regression analysis. 【Result】 Compared with no SS, mixed SS treatment obviously inhibited the increment of root length, root surface area, and root density. Surface SS treatment significantly increased total root length, root volume, and root density in the 0–20 cm soil layer. After 240 days of treatment, total root length in 0–20 cm and 20–40 cm layers in mixed SS treatment were 66.37% and 51.51% of no SS, respectively. Those for surface SS treatment were 115.43% and 98.66% of no SS, respectively. The maximum root total length, root volume, and root density occurred in the 0–20 cm soil layer in surface SS treatment, while the maximum root dry weight and tissue density occurred in the SS layer in surface SS treatment. Mixed SS treatment significantly increased soil pH, soil conductivity, and heavy metal contents of *S. arboricola*. The contents of Cd, Zn, Cu, and Ni in roots of different soil layers in mixed SS treatment were 2.32 to 11.70 times higher than those in no SS treatment. The linear regression analysis showed that the in-situ scanning total root length of *S. arboricola* in 0–20 cm soil layers was significantly positively correlated with in-situ measured soil pH in no SS and surface SS treatment ($P<0.001$). Total root length of *S. arboricola* was significantly negatively correlated with the contents of Cd, Zn, Cu, and Ni in roots ($P<0.001$). 【Conclusion】 Surface application of 10% SS increases soil pH and promotes *S. arboricola* root growth. Mixed application of 10% SS significantly increases root heavy metal uptake in different soil layers and inhibits root growth of *S. arboricola*.

Key words: Sewage sludge; Landscape application; Landscape plant; Root morphology; Heavy metal; pH; *Schefflera arboricola*

我国城市污水污泥量急剧增加, 严重威胁城市生态环境安全, 如何合理处置污泥引起广泛关注^[1]。传统污泥处置方式(如填埋、倒海和焚烧)受场地限制、浪费资源、污染环境且花费大量的处置费用, 已经无法满足生态文明建设要求^[2]。相比之下, 污泥资源化土地利用尤其是污泥林地或园林利用被认为是污泥合理处置的重要方式^[3]。污泥富含有机质、N 和 P 等营养成分, 合理施用后可明显提高土壤肥力并促进植物生长^[4]。然而, 污泥成分非常复杂, 并含有重金属等有害物质^[5]。因此, 污泥的安全土地利用及其对植物生长的影响值得关注。当前大部分的研究主要关注污泥施用对植物地上部生长及重金属吸收的影响, 较少关注污泥施用对植物根系的影响^[6-7]。

根系直接生长在土壤中, 对土壤环境变化反应较地上部敏感^[8]。土壤环境变化直接影响根系的形态构型^[9-11]。研究表明重金属胁迫下, 植物根系粗根比例增加, 细根比例降低, 根比表面积减少^[12]。污泥施用一定程度上改变土壤环境, 并且提高土壤重金属含量^[13]。然而, 污泥施用引起的土壤环境变化对植物根系生长产生的影响效果并不是很清楚。

污泥林地或园林施用具有多种方式^[14], 表施与混施最为常见。相比之下, 污泥表施减少了污泥成分对根系的直接接触, 而污泥混施更容易接触植物根系并对土壤理化性质影响更明显。鹅掌藤 *Schefflera*

arboricola 是常见的浅根型常绿园林植物, 被广泛运用于我国华南地区园林建设中。在前期试验中, 我们分别分析了混施 0%、10%、30%、50%、75% 和 100%(w) 污泥对鹅掌藤生长影响, 发现混施 10% 对其地上部生长有一定促进作用, 而混施 $\geq 30\%$ 的污泥对其地上部有一定抑制作用。然而, 污泥施用对鹅掌藤根系生长有何影响并不清楚。分析污泥施用对鹅掌藤根系生长的影响, 对其他浅根型的灌草园林植物均有一定启发作用。通过原位根箱试验, 本文对比分析表施和混施 10%(w) 污泥对鹅掌藤根系生长的影响, 并结合土壤 pH 和电导率动态变化和根系重金属吸收变化, 探讨污泥施用影响根系生长的原因, 以期加深对污泥施用影响植物根系生长的理解, 并为污泥在园林的安全利用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤为赤红壤, 取自华南农业大学树木园, 风干、过 1 cm 筛备用。试验污泥为 90 d 自然堆肥处理污泥, 由广州市新塘市政污水处理厂提供, 风干过 1 cm 筛备用。试验植物鹅掌藤, 购自广州芳村苗木批发市场(扦插苗, 苗高约 20 cm)。试验原位观察根箱由活动式支撑架、可拆解玻璃根箱和遮光保温膜组成^[15]。根箱高、宽和厚分别为 0.6 m $\times$ 0.3 m $\times$ 0.1 m。土壤及堆肥污泥的基本性质见表 1。

表 1 土壤及堆肥污泥的基本性质

Table 1 Basic properties of soil and composted sludge

试验材料 Testing material	pH	σ / (mS·cm ⁻¹)	w(有机质)/	w/(mg·kg ⁻¹)						
			(g·kg ⁻¹)	碱解氮	有效磷	速效钾				
			Organic matter content	Available N	Available P	Available K	Cd	Ni	Cu	Zn
土壤 Soil	4.68	0.05	2.48	67.26	4.56	47.65	0.12	9.77	20.58	37.93
污泥 Sewage sludge	7.86	3.35	178.35	1 496.48	695.67	498.37	2.39	47.96	419.50	1 070.37

1.2 试验过程

试验设置不施污泥 (No SS)、表施污泥 (Surface SS) 和混施污泥 (Mixed SS)3 个处理。对于不施污泥和表施污泥处理, 将赤红壤装入根箱, 并浇透水, 让土壤自然下陷填实根箱, 装土深度为 50 cm。将鹅掌藤幼苗移栽至根箱 (每个根箱种植 1 棵幼苗)。每个根箱为独立重复, 每处理 3 个重复。覆盖遮光保温膜。按土壤质量的 10% 在土壤表面施用污泥堆肥, 记为表施污泥处理。对于混施污泥处理, 先按土壤质量的 10% 加入污泥堆肥并与土壤充分混匀, 按上面方法装入根箱, 移栽鹅掌藤。各处理均每 3 天浇 1 次水, 根据天气情况每次浇水量为 300~500 mL, 各处理浇水量一致, 确保植物正常生长。

1.3 指标测定

1.3.1 根系生长动态分析 于种植后 60、120 和 240 d, 打开遮光保温膜, 利用大画幅便携扫描仪 (Avision SN900ST, 森鸟电子科技有限公司, 中国) 采集根箱正面根系生长图像, 然后借助根系分析软件 WinRHIZO (WinRHIZO Pro 2017, Regent Instruments Canada Inc., 加拿大) 分污泥层和 0~20、20~40 cm 土壤层分析根系根长、根表面积及根体积^[16]。日均增长量 (R) 计算公式: $R=(X_b-X_a)/(b-a)$, 其中, a 和 b 分别为第 a 和 b 天, X_a 和 X_b 分别为第 a 和第 b 天的某根系指标平均值。

1.3.2 土壤 pH 和电导率原位动态测定 于种植后 60、120 和 240 d, 于根箱背面固定位置 (分别位于土层 10 和 30 cm 处), 利用插土式 pH 计和电导率计, 原位、动态测定土壤 pH 和电导率 (σ)。

1.3.3 根系形态、干质量及相关指标测定 于种植后 240 d, 打开根箱, 按污泥层和 0~20、20~40 cm 土壤层收集植物根系。根系分别用自来水和去离子水洗干净后, 用纸巾吸干水分, 通过扫描和借助根系分析软件 WinRHIZO 分析不同层次的实际根长和根表面积。然后将根系放置鼓风烘箱, 105 ℃

杀青 30 min, 65 ℃ 烘干至恒质量, 用天平称干质量, 并计算以下指标: 比根长 (cm·g⁻¹)=总根长/根干质量; 根组织密度 (g·cm⁻³)=根干质量/根体积; 根密度 (cm·cm⁻³)=总根长/土壤体积, 污泥层、0~20cm、20~40 cm 层的土壤体积分别为 3000、6000、6000 cm³。

1.3.4 植物重金属含量测定 植物样品烘干称质量后, 分离地上与地下部分, 粉碎, 并过 60 目筛备用。称取样品 0.5 g 于微波消解罐中, 加入 5 mL 硝酸, 按照 120 ℃~160 ℃~180 ℃ 的微波消解程序及操作步骤消解试样^[17]。消解液冷却后, 定容至 25 mL。消解液利用原子吸收火焰光度计测定 Cd、Cu、Zn 和 Ni 含量。

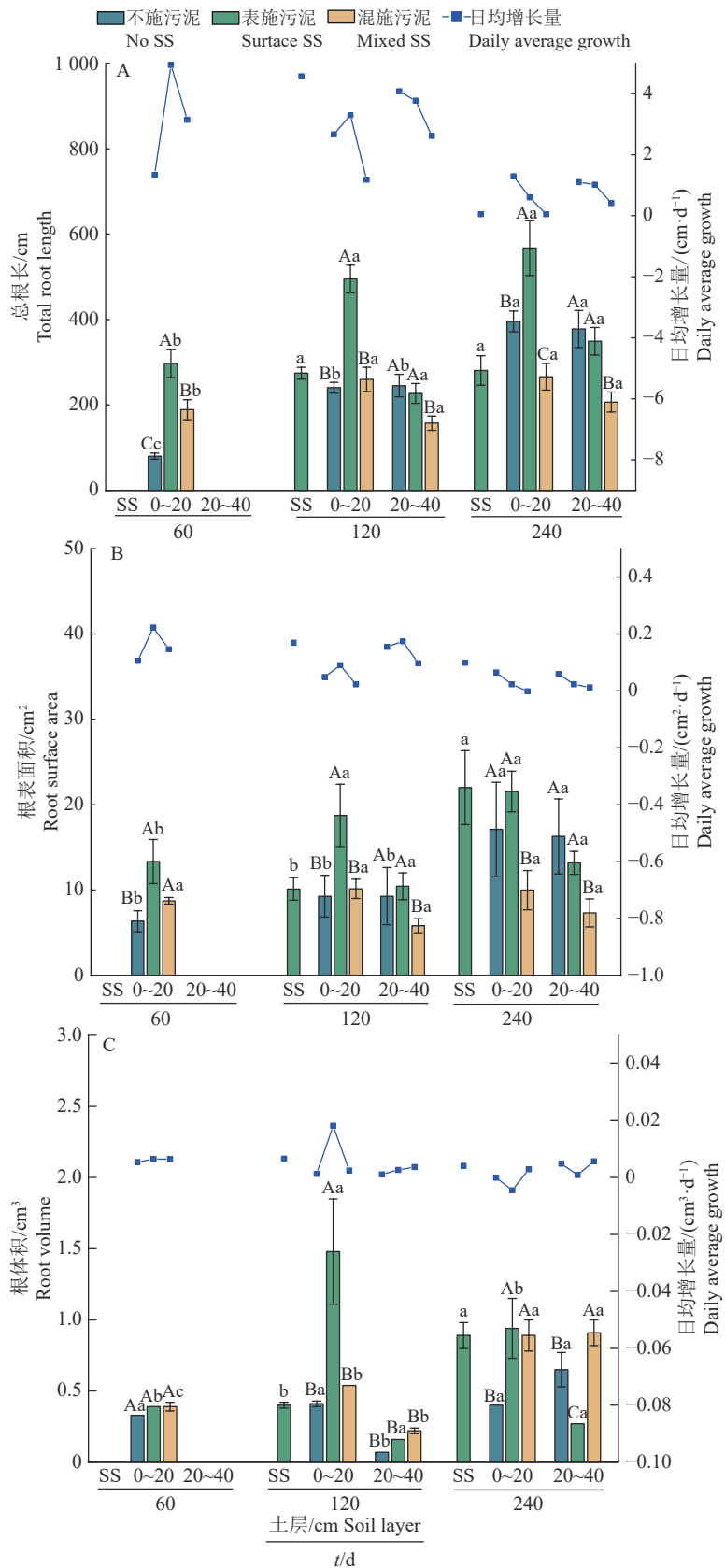
1.4 数据处理与分析

采用多元统计分析软件 SPSS 24.0 (International Business Machines Corp, 美国) 进行单因素方差分析和多重比较, 采用 Duncan's 法对数据进行差异显著性分析。利用 Graphpad prism7.0 (GraphPad Software, 美国) 进行根长与土壤 pH、电导率 (σ) 以及根系重金属含量的线性回归拟合, 然后用 R 软件 (ggplot2 绘图包) 与 Origin 软件进行作图。图表中数据为平均值±标准误, 平均值为 3 个独立根箱获取数据的平均值。

2 结果与分析

2.1 总根长动态变化

表施污泥处理 0~20 cm 土层总根长显著高于不施污泥处理, 种植后 60、120 和 240 d 时表施污泥处理 0~20 cm 土层总根长分别是不施污泥处理的 3.72、2.06 和 1.44 倍; 混施污泥处理各土层总根长低于不施污泥处理, 特别是种植后 120 d 的 20~40 cm 土层和 240 d 各土层混施污泥处理总根长显著低于不施污泥处理, 分别是同一时间同一土层不施污泥处理的 64.09%、67.25% 和 54.69%(图 1A)。鹅掌藤总根长动态变化结果显示, 在 0~20 cm 土层, 与 60 d



SS: 污泥; 柱子上方的不同小写字母表示不同时间的同一处理同一土层的数值差异显著 ($P < 0.05$, 0~20 cm 土层使用 Duncan's 法, 不施污泥层与 20~40 cm 土层使用 t 检验); 柱子上方的不同大写字母表示不同处理的同一时间同一土层的数值差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法)

SS: Sewage sludge; Different lowercase letters on the bars indicate significant differences among the same treatment at different times for the same soil layer ($P < 0.05$, Duncan's method was used for 0~20 cm soil layer, and t test was used for no SS layer and 20~40 cm soil layer); Different capital letters on the bars indicate significant differences among different treatments at the same time for the same soil layer ($P < 0.05$, Duncan's method)

图 1 原位扫描鹅掌藤总根长、根表面积和根体积变化

Fig. 1 Changes of total root length, root surface area and root volume in *Schefflera arboricola* by in-situ scanning

相比, 120 d 时的不同处理根长都显著增加, 而与 120 d 相比, 240 d 时只有 0~20 cm 土层不施污泥处理的总根长显著增加。随时间变化, 不同处理的总根长日均增长量呈现下降趋势。120 d 时不同处理根长日均增长量为 1.18~4.08 cm·d⁻¹, 而 240 d 时降为 0.05~1.29 cm·d⁻¹。变化最明显的是 0~20 cm 土层混施污泥处理, 60、120 和 240 d 时根长日均增长量分别是 3.15、1.18 和 0.05 cm·d⁻¹, 呈下降趋势; 并且 120 和 240 d 时混施污泥处理根长日均增长量均低于同一时间不施和表施污泥处理。

2.2 根表面积动态变化

与不施污泥处理相比, 表施污泥处理各土层根表面积增加, 尤其是 60 和 120 d 时 0~20 cm 土层根表面积显著高于不施污泥处理, 分别是不施污泥处理的 2.10 和 2.02 倍; 混施污泥处理 120 d 时 20~40 cm 土层和 240 d 时混施污泥处理各土层根表面积显著低于不施污泥处理, 分别是不施污泥处理的 62.65%、58.48% 和 44.91%(图 1B)。鹅掌藤根表面积动态变化显示, 不同处理各土层根表面积均增加, 在 0~20 cm 土层, 与 60 d 时相比, 120 d 时表施污泥处理根表面积显著增加, 与 120 d 时相比, 240 d 时不施污泥处理根表面积显著增加。随时间变化, 日均增长量呈现下降趋势, 120 d 时不同处理 20~40 cm 土层的根表面积日均增长量为 0.10~0.17 cm²·d⁻¹, 而 240 d 时降为 0.01~0.06 cm²·d⁻¹。变

化最明显的是混施污泥处理 0~20 cm 土层, 60、120 和 240 d 时的日均增长量分别为 0.14、0.02 和 0.00 cm²·d⁻¹, 并且 120 和 240 d 时均低于同一时间不施和表施污泥处理。

2.3 根体积极动态变化

与不施污泥相比, 表施污泥和混施污泥处理各土层根体积增加, 特别是 120 d 时, 表施污泥处理 0~20 cm 土层根体积显著高于不施污泥处理, 240 d 时, 表施和混施污泥处理 0~20 cm 土层以及混施污泥处理 20~40 cm 土层根体积显著高于不施污泥处理, 分别是相应不施污泥处理的 3.61、2.35、2.23 和 1.40 倍(图 1C)。在 0~20 cm 土层, 与 60 d 时相比, 120 d 时表施污泥与混施污泥处理总根体积显著增加, 与 120 d 时相比, 240 d 时只有混施污泥处理总根体积显著增加, 而表施污泥处理总根体积显著降低。随时间变化, 不施污泥与混施污泥处理 0~20 和 20~40 cm 土层不同时间根体积日均增长量在 0~0.01 cm³·d⁻¹。表施污泥处理 0~20 cm 土层根体积日均增长量 120 d 时达到 0.02 cm³·d⁻¹, 而 240 d 时降至 0 cm³·d⁻¹ 以下, 表施污泥处理 20~40 cm 土层日均增长量 120 和 240 d 时均在 0 cm³·d⁻¹ 以上。

2.4 根系干质量及相关指标

种植 240 d 后, 分土层将鹅掌藤的根系全部挖出, 清洗、扫描分析和烘干称质量后, 获得最终的鹅掌藤根系干质量及相关指标(表 2)。与不施

表 2 收获后根系干质量及相关指标¹⁾
Table 2 Root dry weight and other indexes after harvest

处理	土层/cm	根干质量/g	总根长/cm	根体积/cm ³	比根长/(cm·g ⁻¹)	根组织密度/(g·cm ⁻³)	根密度/(cm·cm ⁻³)
Treatment	Soil layer	Root dry weight	Total root length	Root volume	Specific root length	Root tissue density	Root density
不施污泥 No SS	0~20	6.55±0.74ab	1 140.39±31.00b	2.83±0.09b	177.56±16.38a	2.33±0.33a	0.19±0.01b
	20~40	3.02±0.08ab	1 152.36±33.32a	3.18±0.29a	381.99±18.64a	0.96±0.07a	0.19±0.01a
表施污泥 Surface SS	污泥层SS	13.28±0.59A	430.92±25.68C	1.51±0.26B	32.59±2.38C	9.30±1.38A	0.14±0.01B
	0~20	8.54±0.94aB	1 316.34±33.77aA	3.71±0.27aA	158.14±18.07aB	2.36±0.39aB	0.22±0.01aA
	20~40	4.10±0.72aC	1 136.90±71.77aB	3.31±0.30aA	297.68±58.97aA	1.27±0.29aB	0.19±0.01aA
混施污泥 Mixed SS	0~20	4.53±0.79b	756.92±33.66c	2.21±0.10c	182.20±43.92a	2.07±0.39a	0.13±0.01c
	20~40	1.75±0.33b	593.57±13.14b	2.39±0.17b	369.57±83.47a	0.74±0.16b	0.10±0.00b

1)表中数据为平均值±标准误, n=3; 同列数据后的不同小写字母表示同一土层的不同处理间差异显著(P<0.05, Duncan's法); 同列数据后的不同大写字母表示表施污泥处理不同土层间差异显著(P<0.05, Duncan's法)
1)Values in table are means±SE, n=3; Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences in the same soil layer among different treatments (P<0.05, Duncan's method); Different capital letters after the data in the same column indicate significant differences among different soil layers treated with surface sewage sludge (P<0.05, Duncan's method)

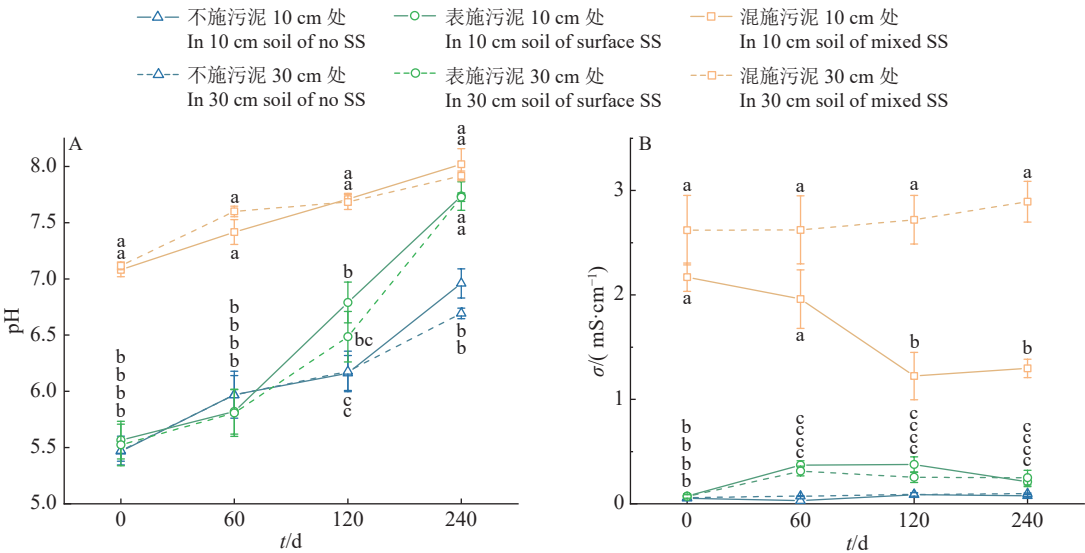
污泥相比,混施污泥各土层总根长、根体积、根密度均显著下降,混施处理的 0~20 和 20~40 cm 土层根干质量分别为不施污泥的 69.16% 和 57.95%,总根长分别为不施污泥的 66.37% 和 51.51%;与不施污泥相比,表施污泥处理 0~20 cm 土层的总根长、根体积和根密度均显著上升,表施污泥处理 0~20 和 20~40 cm 土层根干质量分别为不施污泥的 130.38% 和 135.76%,总根长分别为不施污泥的 115.43% 和 98.66%。最大的总根长、根体积和根密度均出现在表施污泥的 0~20 cm 土层,最大根干质量和根组织密度出现在表施污泥的污泥层。

2.5 原位测定土壤 pH 和电导率动态变化

随着鹅掌藤种植时间延长,不同处理土壤 pH 均呈现上升趋势(图 2)。种植 120 d 前,混施污

泥处理的土壤 pH 均显著高于其他处理。表施污泥 10 cm 土层处的 pH 在种植 120 d 时显著高于不施污泥处理,在种植 240 d 时与混施污泥差异不显著(各土层土壤 pH 为 7.5~8.1,呈弱碱性),2 种施污泥处理的土壤 pH 均显著高于不施污泥处理(各土层 pH 为 6.3~6.6,呈弱酸性)。

与不施污泥处理相比,表施和混施污泥土壤电导率升高,特别是混施污泥处理,不同时间土壤电导率均显著高于表施和不施污泥处理;混施污泥 10 cm 处土壤电导率为 1.22~2.17 mS·cm⁻¹, 30 cm 处为 2.62~2.89 mS·cm⁻¹,是同时间不施污泥处理的 14.11~43.67 倍。随时间延长,混施污泥 10 cm 处土壤电导率逐渐下降,而 30 cm 处土壤电导率逐渐上升;两者在 60 d 后差异显著。



相同时间的不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters in the same time indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method)

图 2 原位测定土壤 pH 和电导率 (σ) 变化

Fig. 2 Changes of soil pH and electrical conductivity (σ) by in-situ measurement

2.6 原位测定土壤 pH 和电导率与原位扫描根长的线性回归分析

分土层原位分析土壤 pH 和电导率变化与鹅掌藤根长的相关性,结果显示,在 0~20 cm 土层,不施污泥和表施污泥的土壤 pH 与根长呈极显著正相关,决定系数 (R^2) 分别为 0.710 5 和 0.696 1(图 3)。在 20~40 cm 土层,不同处理的土壤 pH 和根长相关性不显著。不同处理的不同土层土壤的电导率与鹅掌藤根长相关性也不显著(图 4)。

2.7 植株根系重金属含量

表施和混施污泥处理的各土层根系 Cd、Zn、

Cu 和 Ni 含量较不施污泥有所增加,特别是混施污泥处理,混施污泥处理各土层根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量显著高于不施和表施污泥处理;0~20 cm 土层中混施污泥处理根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量分别为不施污泥的 11.70、4.02、3.04 和 5.35 倍,20~40 cm 土层根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量分别为不施污泥的 6.63、3.57、2.32 和 6.64 倍(表 3)。表施污泥处理的污泥层根系 Zn、Cu 和 Ni 含量显著高于 0~20 和 20~40 cm 土层,特别是 Ni 含量,分别是 0~20 和 20~40 cm 土层的 6.56 和 6.38 倍。

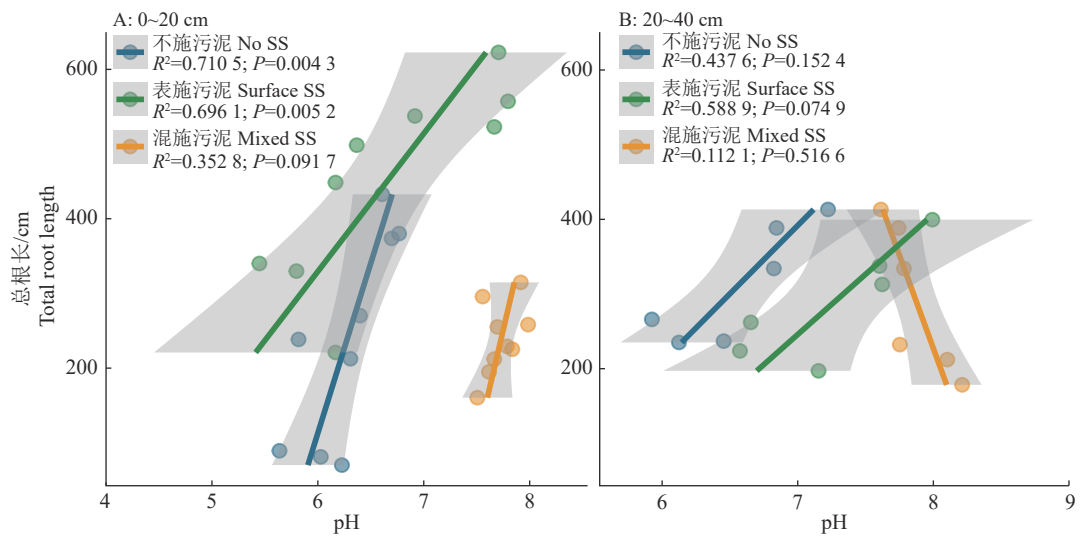


图 3 原位测定土壤 pH 和原位扫描总根长线性回归拟合

Fig. 3 Linearization regression analysis between in-situ measured soil pH and in-situ scanned total root length

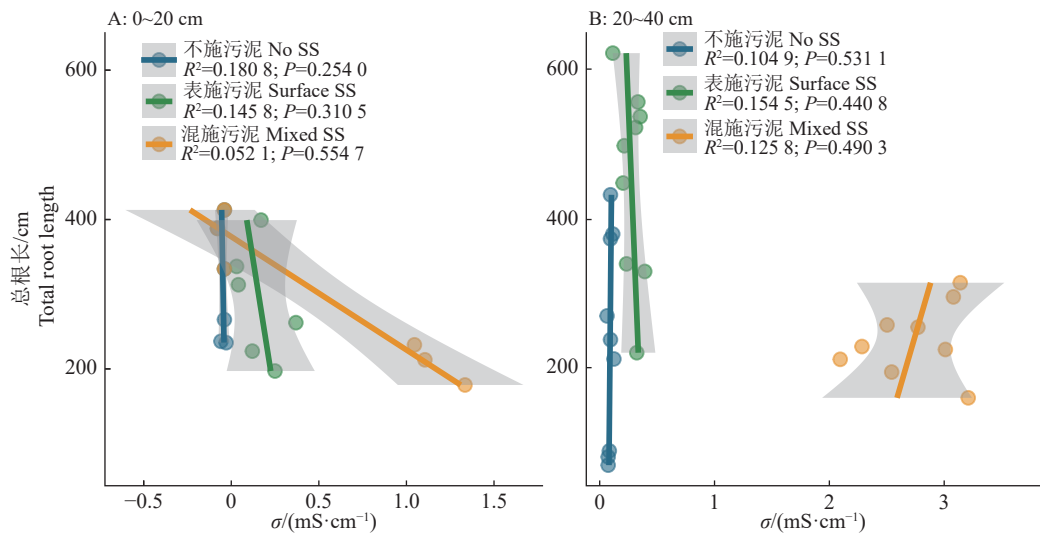


图 4 原位测定土壤电导率和原位扫描总根长线性回归拟合

Fig. 4 Linearization regression analysis between in-situ measured soil electrical conductivity value and in-situ scanned total root length

表 3 鹅掌藤根系重金属含量¹⁾

Table 3 Heavy metal contents in root of *Schefflera arboricola*

处理 Treatment	土层/cm Soil layer	w/(mg·kg ⁻¹)			
		Cd	Zn	Cu	Ni
不施污泥 No SS	0~20	0.23±0.02b	13.61±2.74c	15.39±6.38b	2.34±0.24b
	20~40	0.35±0.07b	14.16±2.17b	19.51±3.80b	1.99±0.06b
表施污泥 Surface SS	污泥层SS	1.43±0.31A	83.88±1.75A	48.64±2.25A	18.11±0.35A
	0~20	1.14±0.21bA	27.38±6.02bB	24.51±8.42bB	2.76±0.96bB
	20~40	0.95±0.10bA	18.94±2.60bB	11.28±0.41bB	2.84±0.60bB
混施污泥 Mixed SS	0~20	2.69±0.50a	54.69±1.39a	46.74±1.96a	12.53±1.87a
	20~40	2.32±0.47a	50.49±1.49a	45.26±1.94a	13.24±0.59a

1) 表中数据为平均值±标准误, n=3; 同列数据后的不同小写字母表示同一土层的不同处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法); 同列数据后的不同大写字母表示表施污泥处理不同土层间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

1) Values in table are means ± SE, n=3; Different lowercase letters after the data in the same column indicate significant differences in the same soil layer among different treatments ($P<0.05$, Duncan's method); Different capital letters after the data in the same column indicate significant differences among different soil layers treated with surface sewage sludge ($P<0.05$, Duncan's method)

2.8 根系重金属含量与根长的回归分析

通过拟合回归分析了收获时鹅掌藤根系重金属含量和整个土层总根长的关系,结果显示,鹅掌藤总根长与根系 Cd、Zn、Cu、Ni 含量均呈极显著负

相关 ($P<0.01$)(图 5), 且其相关性线性回归拟合效果均较好, 尤其是与 Zn、Cu、Ni 的线性拟合效果更好, R^2 均大于 0.8。

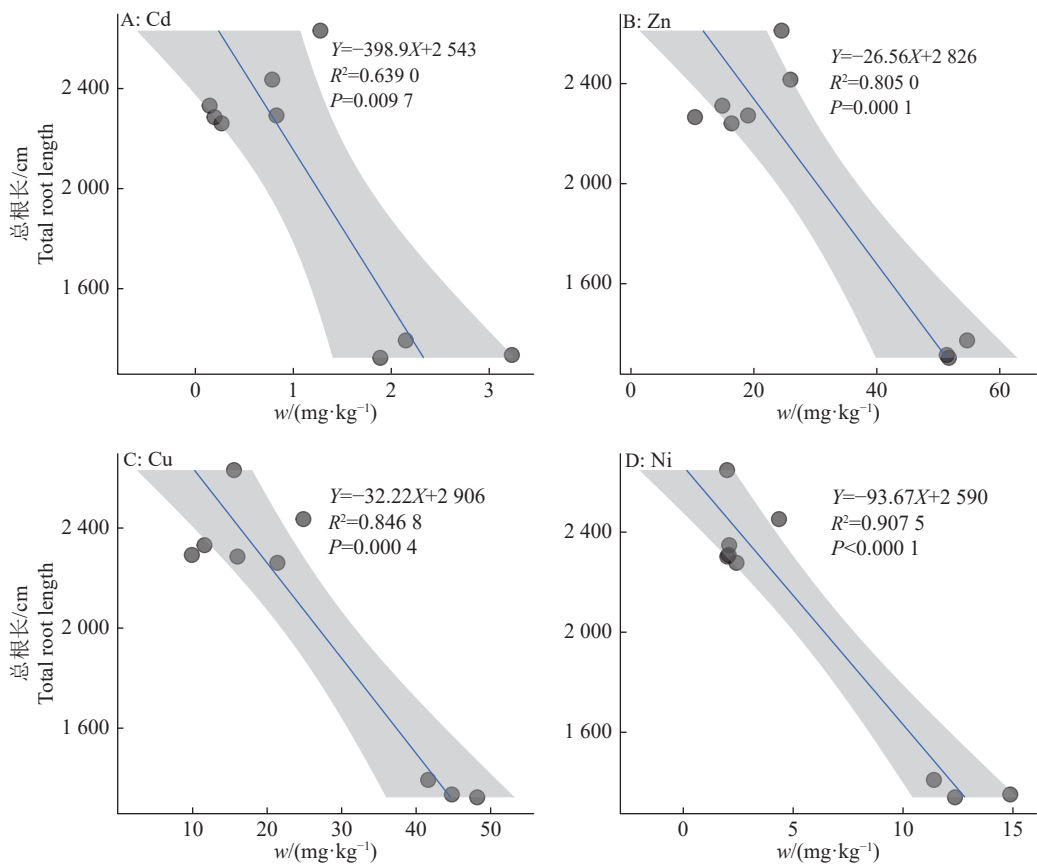


图 5 根系重金属含量和总根长线性回归拟合

Fig. 5 Linearization regression analysis between root heavy metal contents and total root length

3 讨论与结论

3.1 污泥施用方式对鹅掌藤根系生长的影响

污泥土地利用可以改善土壤肥力^[18], 促进植物生长^[19], 但不合理施用污泥将抑制植物生长并导致土壤污染^[20-21]。污泥的安全土地利用引起了广泛关注。以往的研究主要关注污泥施用对植物地上部的影响, 普遍认为污泥施用量低于 30%(w) 均有利于植物生长^[22]。本文分析了污泥表施和混施对鹅掌藤根系生长的影响, 研究发现与不施污泥相比, 混施 10%(w) 污泥显著抑制鹅掌藤根系生长, 表施 10%(w) 污泥对鹅掌藤不同深度根系作用效果不同。与不施污泥相比, 混施污泥处理各土层的根长和根表面积显著降低 (0~20 cm 土层 120 d 除外), 日均增长量逐渐减少; 与不施污泥相比, 表施污泥处理 0~20 cm 土层的根长、根表面积 (240 d 除外) 和根体积显著增长, 而 20~40 cm 土层变化不明显。种植 240 d 后, 最大的总根长、根体积和根密度均出现

在表施污泥的 0~20 cm 土层, 最大根干质量和根组织密度出现在表施污泥的污泥层; 与不施污泥相比, 混施污泥各土层总根长、根体积、根密度均显著下降。根系是植物物质吸收和运输的重要器官, 也是植物直接接触土壤并对土壤环境变化作出最早响应的器官^[23]。植物根系形态随外界条件发生变化, 该变化直接影响植物对环境胁迫的适应性^[20, 24]。污泥混施过程中污泥所含物质可以直接释放到土壤中, 直接改变了土壤理化性质^[25], 并且根系也可以直接接触到污泥。不同的是, 在污泥表施处理中, 主要是污泥中可溶性物质随着土壤水迁移到各层土壤中, 且由于土壤自身的过滤作用, 随着土壤层次加深, 污泥的影响也逐渐减弱^[26]。另外, 在土壤中生长的根系也较少直接接触到施用在土壤表面的污泥。因此, 我们推测在混施处理中, 污泥中有害物质可以长期直接作用于根系并抑制其生长; 而表施处理中, 根系不但避免直接接触污泥有

害物质, 还获取由污泥释放的养分, 进而生长加快。

3.2 污泥施用方式对土壤 pH、电导率及鹅掌藤根系重金属含量的影响

前人研究发现高浓度的盐和重金属显著抑制植物根生长, 导致植物根长、根表面积、根体积等显著降低; 适当浓度的盐和重金属则促进根生长^[27-29]。陈方圆等^[29]发现随着土壤盐浓度的增加, 植物的地上与地下部生长受到抑制, 当土壤盐浓度达到 50 mmol·L⁻¹ 时能够显著抑制植物的生长。He 等^[27]发现 0.1 μmol·L⁻¹ 的 Cd 能够促进植物根系生长, 当浓度达到 5 μmol·L⁻¹ 时显著抑制根系的生长。土壤 pH 影响元素的有效性, 进而影响植物的生长^[30]。当土壤呈酸性时, 土壤 Cd 的活性受植物根际效应影响显著, Cd 以富里酸结合态存在于根际; 而土壤呈中性和碱性时, Cd 主要被土壤中三水铝矿吸附和形成碳酸盐沉淀^[31]。另外, 土壤电导率主要表征土壤溶液中可溶性盐浓度, 当土壤电导率高于 2 mS·cm⁻¹ 时, 大部分植物的根系细胞内外离子平衡和水肥吸收受到不利影响^[32]。污泥是一种碱性有机物料, 并含有一定量的重金属和丰富的可溶性盐分; 施用污泥影响土壤 pH, 提高土壤重金属含量, 增加土壤可溶性盐分并提高土壤电导率^[33]。本文进一步分析不同土壤层 pH 和电导率的时间动态变化以及根系重金属含量, 并拟合这些指标与根长的相关性。结果发现, 尽管污泥施用提高了土壤电导率, 但与其他植物不同, 土壤电导率时间动态变化与鹅掌藤根长时间动态变化的相关性不显著。这可能与鹅掌藤细胞汁液中 Na⁺、K⁺和 Ca²⁺浓度相对较高, 对土壤盐分和水分变化不敏感有关^[34]。有趣的是, 鹅掌藤根长均与根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量呈极显著负相关, 且在 0~20 cm 土层, 不施污泥和表施污泥的土壤 pH 与根长呈极显著正相关。混施污泥显著增加各土层鹅掌藤根系 Cd、Zn、Cu 和 Ni 含量。当细胞内这些重金属含量超过一定阈值时, 将造成细胞膜损坏及膜质氧化^[35-36], 进而抑制植物根系生长。不同的是, 鹅掌藤在表施污泥处理中吸收的重金属较少, 尚未达到毒害浓度, 故没有抑制根系生长。相反, 表施污泥一定程度上提高了 0~20 cm 土层 pH, 并带来一定量有效养分, 进而促进根系生长。尽管污泥混施也提高了土壤 pH 和土壤养分, 但由于重金属的抑制作用更突出, 故表现出抑制根系生长。此外, 不同污泥施用方式可能对根系代谢、微生物组成和功能等微生态环境的影响也不同, 这些根际微生物环境变化是否也影响根系的生长有待进一步的研究。另外, 随着种植时间延长, 不施污泥处理的土壤 pH 也一

定程度升高, 这是否与鹅掌藤根系吸收致酸离子 H⁺和 Al³⁺有关, 仍需深入研究。

3.3 结论

不同污泥施用方式对鹅掌藤根系生长影响不同。混施污泥一定程度抑制根系生长; 在处理 240 d, 各土层总根长、根体积、根密度均显著低于不施污泥处理。表施污泥促进 0~20 cm 土层根系生长, 根干质量、总根长、根体积、根组织密度和根密度均一定程度提高。混施污泥显著提高土壤 pH、电导率和根系重金属含量, 表施污泥一定程度提高土壤 pH 和电导率。在 0~20 cm 土层表施污泥的土壤 pH 与根长呈极显著正相关。鹅掌藤根长均与根系 Cd、Zn、Cu、Ni 含量呈极显著负相关。表施 10%(w) 污泥提高 0~20 cm 土层土壤 pH, 并有效促进了鹅掌藤根系生长; 混施 10%(w) 污泥导致鹅掌藤根系重金属含量增加, 进而抑制根系生长。

参考文献:

[1] YAKAMERCAN E, ARI A, AYGÜN A. Land application of municipal sewage sludge: Human health risk assessment of heavy metals[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 319: 128568. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128568.

[2] 安叶, 张义斌, 黎攀, 等. 我国市政生活污水处置现状及经验总结[J]. *给水排水*, 2021, 57(S1): 94-98.

[3] JAFFAR ABDUL KHALIQ S, AHMED M, ALWARDY M, et al. Wastewater and sludge management and research in Oman: An overview[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2017, 67(3): 267-278.

[4] 王丽霞, 杜子文, 封莉, 等. 连续施用城市污泥后林地土壤中重金属的含量变化及生态风险[J]. *环境工程学报*, 2021, 15(3): 1092-1102.

[5] LIU H. Achilles heel of environmental risk from recycling of sludge to soil as amendment: A summary in recent ten years (2007–2016)[J]. *Waste Management*, 2016, 56: 575-583.

[6] KCHAOU R, BACCAR R, BOUZID J, et al. The impact of sewage sludge and compost on winter triticale[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(19): 18314-18319.

[7] SI L Q, PENG X W, ZHOU J X. The suitability of growing mulberry (*Morus alba* L.) on soils consisting of urban sludge composted with garden waste: A new method for urban sludge disposal[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(2): 1379-1393.

[8] RELLÁN-ÁLVAREZ R, LOBET G, DINNENY J R. Environmental control of root system biology[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2016, 67: 619-642.

[9] 阮可瑾, 谢宝玥, 邓应生, 等. 铁冬青幼苗对污染土壤中铅、镉的耐受、吸收和累积[J]. *华南农业大学学报*,

- 2022, 43(3): 50-58.
- [10] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(7): 117-124.
- [11] CORREA J, POSTMA J A, WATT M, et al. Soil compaction and the architectural plasticity of root systems[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2019, 70(21): 6019-6034.
- [12] WU D, YU X, LAI M, et al. Diversified effects of co-planting landscape plants on heavy metals pollution remediation in urban soil amended with sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 403: 123855. doi: 10.1016/j.jhazmat.2020.123855.
- [13] KOWALIK R, WIDŁAK M, WIDŁAK A. Sorption of heavy metals by sewage sludge and its mixtures with soil from wastewater treatment plants operating in MBR and INR technology[J]. *Membranes*, 2021, 11(9): 706. doi: 10.3390/membranes11090706.
- [14] 丁洪, 余居华, 郑祥洲, 等. 中国城市污泥应用对作物产量、品质和土壤质量的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(9): 1933-1942.
- [15] 吴道铭, 张书源, 董晓全, 等. 根箱法原位分析黄梁木幼苗移栽后的根系生长[J]. *中南林业科技大学学报*, 2020, 40(7): 9-17.
- [16] 李燕丽, 王昌昆, 卢碧林, 等. 基于微根管技术的盐胁迫下小麦根系生长原位监测方法[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 599-609.
- [17] DEBOSZ K, PETERSEN S O, KURE L K, et al. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties[J]. *Applied Soil Ecology*, 2002, 19(3): 237-248.
- [18] 徐玉玲, 冯巩俐, 蒋晓煜, 等. 兰州市某交通干道土壤重金属分布特征及其对绿化植物的影响[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(4): 1341-1348.
- [19] 姚佳璇, 俄胜哲, 袁金华, 等. 城市污泥农用对灌漠土作物产量及土壤质量的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(7): 2120-2132.
- [20] 谢换换, 叶志鸿. 湿地植物根形态结构和泌氧与盐和重金属吸收、积累、耐性关系的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 864-875.
- [21] ZHANG H, QI H Y, ZHANG Y L, et al. Effects of sewage sludge pretreatment methods on its use in agricultural applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 428: 128213. doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.128213.
- [22] WU D, CHU S, LAI C, et al. Application rate and plant species affect the ecological safety of sewage sludge as a landscape soil amendment[J]. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2017, 27: 138-147.
- [23] HU X F, LI W T, LIU Q H, et al. Root physiological responses can explain the effects of short-term plant-plant interactions on growth of two subalpine coniferous species[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2021, 51(11): 1595-1606.
- [24] CHUNTHABUREE S, DONGSANSUK A, SANIT-CHON J, et al. Physiological and biochemical parameters for evaluation and clustering of rice cultivars differing in salt tolerance at seedling stage[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2016, 23(4): 467-477.
- [25] 董晓芸, 柯凯恩, 胡自航, 等. 施用不同污泥堆肥对土壤理化性质及微生物活性的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2021, 46(6): 70-75.
- [26] BELHAJ D, ELLOUMI N, JERBI B, et al. Effects of sewage sludge fertilizer on heavy metal accumulation and consequent responses of sunflower (*Helianthus annuus*) [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(20): 20168-20177.
- [27] HE J Y, ZHU C, REN Y F, et al. Root morphology and cadmium uptake kinetics of the cadmium-sensitive rice mutant[J]. *Biologia Plantarum*, 2007, 51(4): 791-794.
- [28] CHAI M W, SHI F C, LI R L, et al. Effect of NaCl on growth and Cd accumulation of halophyte *Spartina alterniflora* under CdCl₂ stress[J]. *South African Journal of Botany*, 2013, 85: 63-69.
- [29] 陈方圆, 古勇波, 白江珊, 等. 淹水和盐胁迫对湿地植物菰生长的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(5): 1484-1491.
- [30] TURNER A J, ARZOLA C I, NUNEZ G H. High pH stress affects root morphology and nutritional status of hydroponically grown *Rhododendron* (*Rhododendron* spp.)[J]. *Plants*, 2020, 9(8): 1019. doi: 10.3390/plants9081019.
- [31] 廉梅花. 根际土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [32] AHN T I, SHIN J H, SON J E. Theoretical and experimental analyses of nutrient control in electrical conductivity-based nutrient recycling soilless culture system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 656403. doi: 10.3389/fpls.2021.656403.
- [33] KOMINKO H, GORAZDA K, WZOREK Z. Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114417. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114417.
- [34] 列志旸. 华南地区 7 种园林植物的耐盐性评价研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- [35] MAHMOOD S, ISHTIAQ S, YASIN G, et al. Dose dependent rhizospheric Ni toxicity evaluation: Membrane stability and antioxidant potential of *Vigna* species[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2016, 76(3): 378-384.
- [36] SRIVASTAVA S, SRIVASTAVA A K, SUPRASANAP, et al. Comparative biochemical and transcriptional profiling of two contrasting varieties of *Brassica juncea* L. in response to arsenic exposure reveals mechanisms of stress perception and tolerance[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(12): 3419-3431.